

# Tuulivoimatukien hyvinvointivaikutukset Pohjoismaissa ja maailmalla

Kandidaatintutkielma

Jaakko Markkanen

Aalto-yliopiston Kauppakorkeakoulu

Taloustieteen kandidaattiohjelma

Kesä 2017

<b>Tekijä</b> Jaakko Markkanen		
<b>Työn nimi</b> Tuulivoimatukien hyvinvointivaikutukset Pohjoismaissa ja maailmalla		
<b>Tutkinto</b> Kauppatieteiden kandidaatti		
<b>Koulutusohjelma</b> Taloustieteen kandidaattiohjelma		
<b>Työn ohjaaja</b> Pekka Ilmakunnas		
<b>Hyväksymisvuosi</b> 2017	<b>Sivumäärä</b> 23	<b>Kieli</b> Suomi

### Tiivistelmä

Kandidaatintyöni on kirjallisuuskatsaus. Käyn lävitse sähkömarkkinoiden rakentumisen epäelastisesta kysyntäkäyrästä ja eri tuotantoteknologioiden rajakustannuksia kuvaavasta asteittain kasvavasta tarjontakäyrästä. Tutkin kirjallisuutta läpikäymällä, millaisia vaikutuksia uusiutuviin energianlähteisiin perustuvalle sähköntuotannolle maksetuilla tuotantotuilla on sähkömarkkinoilla. Tulokseni on, että subventioiden myötä alhaisten rajakustannusten uusiutuviin energianlähteisiin perustuva sähköntuotanto syrjäyttää markkinoilla fossiilisten polttoaineiden polttamiseen perustuvaa korkean rajakustannuksen tuotantoa, millä on hintaa laskeva vaikutus sähkömarkkinoilla. Kirjallisuudessa tästä mekanismista käytetään nimitystä merit order -efekti. Yleisestä mielikuvasta poiketen tuotantotukien maksaminen on merit order -efektin vuoksi etenkin tuulivoiman osalta osoittautunut kuluttajien kannalta ylijäämiä kasvattavaksi politiikaksi.

Kiinnitän työssäni myös huomiota tuotantotukien ja päästökaupan sekä hiiliveron väliseen vertailuun. Päästökaupan ja hiiliveron tiedetään vyöryttävän päästövähennysten kustannukset lähes kokonaan kuluttajien maksettavaksi, millä on monia ei-toivottuja seurauksia yhteiskunnalle syntyvien kustannusten ja päästövähennysten kannalta. Koska tuuli- ja aurinkovoima ovat päästöttömiä tuotantomuotoja, merit order -efekti laskee myös sähköntuotannon kokonaispäästöjä. Tulosten perusteella tuuli- ja aurinkovoimalle maksetut tuet ovat älykäs vaihtoehto osana energia- ja ympäristöpolitiikkaa.

---

**Avainsanat** tuulivoima, aurinkovoima, tuotantotuet, ympäristötaloustiede, merit order -efekti

---

# Sisällysluettelo

1. Johdanto .....	3
2. Sähkömarkkinoiden yleinen rakenne .....	4
2.1 Sähkö hyödykkeenä.....	4
2.2 Kysyntäkehikko.....	4
2.3 Tarjontakehikko.....	6
2.4 Sähkömarkkinoiden yleiset ongelmat: kysyntä- ja tarjontashokit.....	8
2.5 Nord Pool Spot ja sen rakenne .....	10
3. Tuotantotuet .....	11
3.1 Motiivit tuulivoiman tukemiselle .....	11
3.2 Merit order -ilmiö ja hintataso markkinoilla .....	12
3.4 Kuluttajien maksuhalukkuus ja tukien kannattavuus .....	15
4. Vertaileva analyysi.....	18
4.1 Päästökauppa ja hiilivero.....	18
4.2 Kustannukset tuottajapuolella .....	21
4.3 Volatiliteetti markkinoilla .....	21
4.4 Erot subventiojärjestelmissä.....	22
5. Johtopäätökset.....	24
Lähdeluettelo.....	26

# 1. Johdanto

Sähköntuotanto on maailman suurin yksittäinen hiilidioksidipäästöjen lähde maailmassa (US EPA 2016). Nykyisessä markkinatilanteessa fossiilisiin energialähteisiin nojaavat tuotantotavat eivät kohtaa niiden tosiallisia yhteiskunnallisia kustannuksia tuotannon aiheuttamista kasvihuonepäästöistä. Seurauksena on mittavat negatiiviset ulkoisvaikutukset yhteiskunnalle liiallisesta fossiilisten energianlähteiden hyödyntämisestä sähköntuotannossa (Borenstein 2012). Uusiutuville tuotantotavoille myönnetty tuotantotuet ovat eräs tapa ohjata tuotantoa markkinoilla kohti vähänpäästöisempiä ja yhteiskunnan kannalta kestävämpiä tuotantomenetelmiä. Tutkielmassani uusituville energiantuotantotavoilla tarkoitetaan jatkossa *vain* tuulivoimaa ja aurinkovoimaa, jättäen vesivoiman niiden ulkopuolelle. Subventioiden maksaminen on taloudellisesti mielekästä, sillä tuulivoiman ja aurinkosähkön subventioiden on useassa tutkimuksessa todettu laskevan sähkön markkinahintaa (Würzburg, Labandeira et al. 2013). Hintaa alentava mekanismi tunnetaan kirjallisuudessa paremmin nimellä merit order -efekti.

On olemassa vahvoja todisteita sille, että etenkin tuulivoimatuotannolle maksetut tuet ovat nettovaikutukseltaan positiivisia kuluttajille (Azofra, Jiménez et al. 2014, Liski, Vehviläinen 2016, Clò, Cataldi et al. 2015). Pyrin opinnäytössäni vastamaan kysymykseen siitä, miksi tuulivoimalle ja muille uusiutuville energianlähteille maksetut tuotantotuet laskevat sähkömarkkinoiden hintaa ja missä olosuhteissa vaikutus on nettopositiivinen kuluttajille. Toiseksi käsittelen sitä, kuinka vaihtoehto uusiutuville maksetut tuotantotuet ovat päästöjen vähentämisessä verrattuna ympäristötaloustieteessä tunnettuihin muihin vaihtoehtoihin kuten hiiliveroon ja päästökauppaan.

Kandidaatintyöni on kirjallisuuskatsaus, joka on jaettu neljään varsinaiseen osioon. Ensimmäisessä varsinaisessa osiossa käyn lävitse sähkömarkkinoiden muodon kysynnän ja tarjonnan kehikkoja hyväksikäyttäen. Tämän jälkeen analysoin sähkömarkkinoilla tavattuja yleisiä ongelmatilanteita ja esittelen lyhyesti pohjoismaisen sähköpörssin toiminnan. Tutkielman toisessa varsinaisessa osiossa käsitellen tuulivoimalle ja muille uusiutuville tuotantotavoille maksettujen tukien vaikutuksia sähkömarkkinoilla sekä niiden kannattavuutta kuluttajien näkökulmasta. Kolmannessa varsinaisessa osiossa vertailen tukia muihin päästöjen vähentämiseen tähtääviin taloudellisiin järjestelmiin. Lisäksi käyn lyhyesti lävitse tukien vaikutukset sähkön tuottajien kannalta sekä niiden merkityksen markkinahinnan volatiliiteetin kasvussa. Vertailen myös merkitystä suomalaista tukijärjestelmän juridisesta eroavaisuudesta yleiseurooppalaisesta mallista. Viimeinen osio sisältää johtopäätökset.

## 2. Sähkömarkkinoiden yleinen rakenne

### 2.1 Sähkö hyödykkeenä

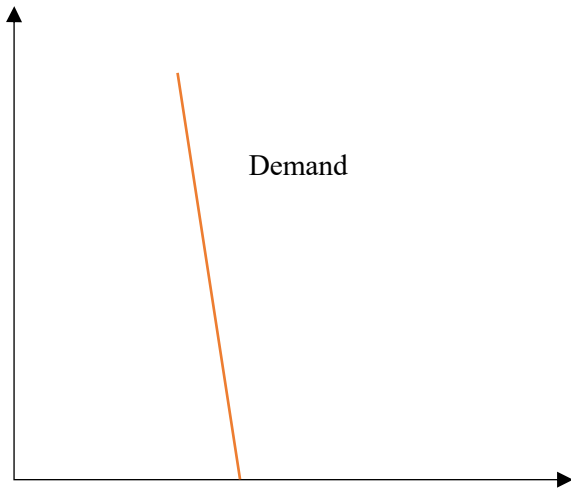
Sähkö on hyödykkeenä erityinen, sillä sähkö on kulutettava samalla hetkellä, kun se luodaan. Teollisessa mittakaavassa tehokkaita tapoja varastoida sähköä ei ole olemassa nykyisellä teknologian tasolla. Fyysisiltä ominaisuuksiltaan sähkö on elektronien liikettä johtimessa, minkä johdosta sähkö on myös täysin homogeeninen hyödyke. Alkeishiukkasten välillä ei ole lainkaan eroavaisuuksia, eikä sähkön ominaisuuksiin siis vaikuta tapa, jolla sähkö on tuotettu.

### 2.2 Kysyntäkehikko

Sähkömarkkinoiden kysynnän analysoinnissa keskeinen mittari on sähköön kysynnän hintajousto. Oppikirjamääritelmän mukaan kysynnän hintajousto tarkoittaa sitä prosentuaalista muutosta kysynnässä, joka on seurausta yhden prosenttiyksikön muutoksesta hinnassa. Kysyntä on joustavaa silloin kun hintajouaston arvo on yli yhden ja joustamatonta kun sen arvo alle yhden. Hintajouaston ollessa tasan yksi, kyse on yksikköjoustavasta kysynnästä.

Viimeisin laaja tutkimus energian ja sen tuotantotapojen hintajoustoista on maaliskuussa 2017 julkaistu Labandeiran, Labeagan ja López-Oteron meta-analyysi. Tutkimustulostensa perusteella he arvioivat metaregressiota käyttäen sähköön lyhyen aikavälin hintajouaston olevan -0,126 ja pitkäaikavälin hintajouaston olevan -0,365 (Labandeira, Labeaga et al. 2017). Vaikka tuloksia ei ole saavutettu tilastollisesti merkitsevällä tasolla, ne ovat yhdenmukaisia aikaisempien meta-analyysien (Espey, Espey 2004, Heshmati 2014) ja muiden tutkimusten kanssa (Lijesen 2007, Genc 2016, Schulte, Heindl 2017). Lukujen perusteella sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä sähköön kysyntä on joustamatonta, joskin pitkällä aikavälillä kysyntä on joustavampaa kuin lyhyellä aikavälillä. Tämä on loogista, sillä pitkällä aikavälillä sähköön kuluttajilla on mahdollisuus vaikuttaa kulutukseensa joustavammin esimerkiksi investoimalla energiatehokkaampiin laitteisiin. Lisäksi pitkällä aikavälillä runsaasti sähköä tuotannossaan käyttävä teollisuus voi optimoida tuotantoaan alhaisemman hinnan ajanjaksoille. Lyhyellä aikavälillä hintapiikkeihin sopeutuminen teollisuuden piirissä ei useinkaan ole kannattavaa, sillä tuotannon alasajo ja uudelleenaloittaminen ovat kalliita tehdä.

Hintajousto on hyvä mittari pohtiessamme kysyntäkäyrän mahdollista muotoa. Joustamattoman kysynnän tapauksessa tiedämme kysytyn määrän pysyvän likipitäen samana suhteessa hintaan. Teorian perusteella tiedämme epäelastisen kysyntäkäyrän olevan jyrkkä laskeva suora (Kuva 1).



Kuva 1: Epäelastinen kysyntäkäyrä. Lähde: itse laadittu.

Sähkömarkkinoiden yhteydessä käytetään usein termiä ”Demand response” eli DR, joka liittyy läheisesti kysynnän hintajoustoon. Alabadin ja El-Saadanyin (2008) mukaan DR tarkoittaa muutosta loppukäyttäjän normaaleissa sähkönkulutuksen kulutustavoissa heidän reagoidessaan muutokseen sähkön hinnassa. Vaikka DR ja kysynnän hintajousto liittyvät läheisesti toisiinsa, ne eivät kuitenkaan ole täysin sama asia, sillä kysynnän hintajoustolla on yksiselitteinen matemaattinen määritelmä. Sen voidaan kuitenkin yleisesti ottaen käsittää olevan DR:n mittari. Alabadin ja El-Saadanyin (2008) esittävät myös toisen määritelmän DR:lle. Sen mukaan DR voi tarkoittaa myös olemassa olevia kannustimia vähentää sähkönkulutusta markkinoilla syntyneen kysyntäpiikin tai muun sähköverkkoa uhkaavan tilan aikana. Molemmat määritelmät kuitenkin kuvaavat pohjimmiltaan samaa ilmiötä kysynnän joustamattomuuden taustalla.

Kirjallisuudessa on tutkittu syitä kysynnän joustamattomuuden takana. Kirchenin (2003) mukaan alhaista hintajouston tasoa selittävät kaksi tekijää. Ensinnäkin sähkön osuus kotitalouksien kokonaiskustannuksista tai yritysten valmistuskustannuksista on varsin pieni suhteessa sen tuottamaan hyötyyn. Markkinoilla rationaalinen kuluttaja ei vähennä kulutustaan niin kauan, kun hänen kohtaamansa rajakustannus on saatua hyötyä pienempi. Tämän seurauksena korkeatkaan hinnat eivät välttämättä merkittävässä määrin vähennä kokonaiskysyntää. Lisäksi useimmiten sähkön loppukuluttaja maksaa pysyvän kiinteän hinnan kuluttamastaan sähköstä, minkä vuoksi kuluttajilla

ei ole kannustinta vähentää kulutustaan hetkellisen hinnannousun myötä. Nykyisin sähkön vähittäismyyjät hinnoittelevat hintapiikin riskin valmiiksi sopimuksiin vastineeksi kantamastaan riskistä. Toisena syynä joustamattomalle kysynnälle Kirschen (2003) korostaa sähkön historiallista asemaa hyödykkeenä, jonka kuluttaminen on helppoa ja vaivatonta. Tarkemman hyöty-kustannus - analyysin epäkäytännöllisyyden ja kustannusten vuoksi harva kuluttaja edes pohtii kuluttamansa sähkön hintatasoja arkielämässään. Sähkö onkin hyödykkeenä integroitunut syvälle nykyisiin kulutustottumuksiin.

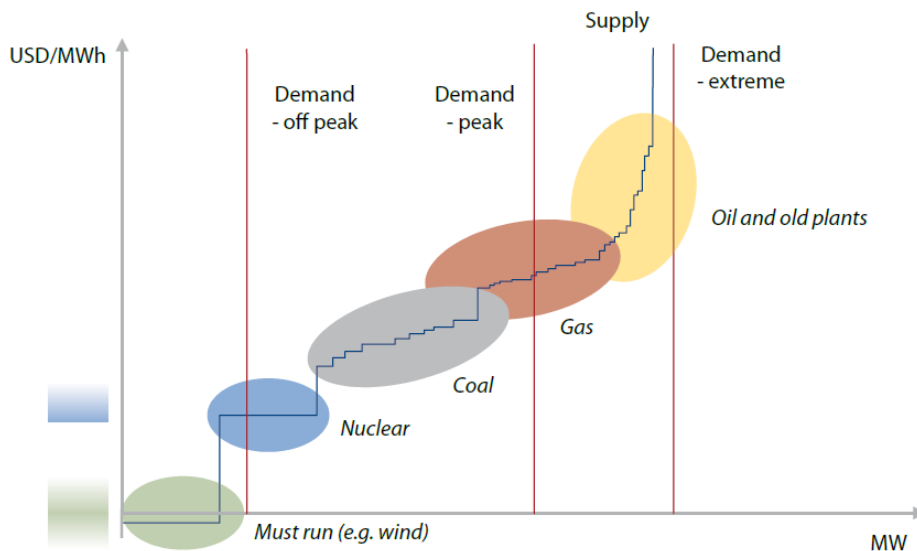
Joustamattomasta kysynnästä huolimatta kysyntä ei suinkaan ole vakioista, vaan se vaihtelee merkittävästi eri ajanjaksojen välillä. Tätä kutsutaan sähkön kysynnän syklisyydeksi. Cartean ja Villaplanan (2008) mukaan kysyttyyn määrään vaikuttavat eniten kaksi komponenttia: taloudelliseen aktiivisuus ja ilmasto. Taloudellinen aktiivisuus vaihtelee esimerkiksi viikonpäivien mukaan, sillä arkena sähköä kulutetaan usein enemmän kuin viikonloppuna. Vastaavasti säällä ja etenkin lämpötilalla on merkittävä vaikutus kulutettuun sähkön määrään. Ilmiötä voidaan havainnollistaa sillä, että kuumissa ilmastoissa hellejaksojen aikana ihmiset käyttävät sähköä asuntojen viilentämiseen ja pohjoisissa maissa kylminä talvipäivinä sähköä kulutetaan lämmittämiseen. Kirjallisuudessa sähkön kulutuksen suhdetta sääoloihin on tutkittu paljon, ja sen tiedetään synnyttävän merkittävää vaihtelua sähkön kysyttyyn määrään. Esimerkiksi Pohjoismaissa lämpötila selittää lähes kaiken kuukausittaisen vaihtelun kulutuksessa eri vuodenaikojen välillä (Liski, Vehviläinen 2016). Vastaavia tuloksia on saatu myös muualla Euroopassa ja lämpötilan merkittävän vaikutuksen on havaittu pätevän yleisesti (Bessec, Fouquau 2008).

## 2.3 Tarjontakehikko

Taloustieteen teorian mukaan kilpailuilla markkinoilla markkinoiden tarjontakäyrä vastaa tuottajien yhteenlaskettua marginaalikustannusten käyrää (aggregated supply). Sähkömarkkinoilla marginaalikustannukset vaihtelevat merkittävästi eri tuotantotapojen välillä, minkä vuoksi markkinoiden tarjontakäyrä on perinteisesti käsitetty olevan muodoltaan gradualistinen eli asteittainen ja kasvavan pykälinä (Borenstein 2000, Hjalmarsson 2000, Salvatore 2010).

Salvadoren Kansainväliselle Energiavirastolle tekemässä raportissa tarjontakäyrä havainnollistettiin Kuvan 2 osoittamalla tavalla. Tarjontakäyrä kuvaa tuotantotapojen marginaalikustannusten lisäksi kunkin kustannustason olemassa olevaa tuotantokapasiteettia. Alimmalla tasolla tuotannon rajakustannus on nolla ja kyseiselle tasolle asettuvat esimerkiksi vesivoima ja useat muut uusiutuvien energialähteiden tuotantotavoista kuten aurinkosähkö ja tuulivoima. Näiden tuotantotapojen

energianlähde on ilmaista, minkä vuoksi tuotannon muuttuvat kustannukset vastaavat ainoastaan likipitään tuotantolaitosten huoltokustannuksia.



Kuva 2: Sähkömarkkinoiden tarjontakäyrä. Lähde: (Salvadore 2010).

Tarjontakäyrällä seuraava taso koostuu ydinvoimasta ja sitä seuraavat korkeammat tasot eri lauhdetuotannoista, kuten kivihiihivoimaloista sekä kaas- ja öljyvoimaloista. Näiden laitosten tuotantokustannukset ovat suuresti riippuvaisia käytetyn energianlähteen markkinahinnasta, tuotannon hyötysuhteesta ja nykyään myös mahdollisista sääntelijän asettamista hinnoista hiilidioksiditonneille. Tämän seurauksena näiden tuotantomuotojen rajakustannukset ovat korkeampia.

Sähkömarkkinoilla tarjontakäyrästä käytetään myös nimitystä ”Merit order curve”. (Y. He, M. Hildmann et al. 2013). Nimitys tulee siitä, että sähköpörssissä sähkön tuotannon kokonaiskustannus pyritään minimoimaan siten, että ensimmäisenä markkinakysyntään vastataan alhaisimman rajakustannuksen tuotannolla. Tämä tarkoittaa myös sitä, että alhaisen rajakustannuksen tuotanto käytetään aina kokonaisuudessaan ennen siirtymistä seuraavalle tuotannon tasolle (I. Staffell, R. Green 2016). Lisäksi lainsäätäjä on usein määrännyt prioriteetin, aurinkosähkön ja tuulivoiman myymiselle sähköpörssissä. Markkinahinta puolestaan määräytyy sähköpörssissä viimeisenä käytetyn tuotantotavan mukaisesti, jolloin hintaa alemman rajakustannuksen tuotantotavat saavat syntyneen erotuksen voittona itselleen. Joudumme kuitenkin oletamaan sähkömarkkinoiden olevan kauttaaltaan kilpaillut, sillä vain tällöin perinteisen mikrotalousteorian mukaan tuottajan kannattaa



tarjota hyödykettään rajakustannushintaan (A. K. David, Fushuan Wen 2000). Epätäydellisillä markkinoilla sähköpörssissä esiintyvien tarjousten perusteella ei voida täysin tunnistaa eri tuotantotapojen rajakustannuksia. Eräs epätäydellisen kilpailun malliesimerkki sähkömarkkinoilla on vesivoiman tuottajien mahdollisuus säännöstellä tuotantoansa. Muista tuotantotavoista poiketen vesivoiman tuottajat pystyvät usein hyvinkin tarkasti säätelemään vesivarantojensa määriä, jolloin hinnoittelussa otetaan huomioon rajakustannuksen lisäksi vaihtoehtoiskustannus mahdollisesta korkeammasta markkinahinnasta tulevaisuudessa. Muilla uusiutuvien energianlähteiden tuotantotavoilla vastaavaa mahdollisuutta ei toistaiseksi ole olemassa, sillä akkuteknologian kalleuden vuoksi tuotettua sähköä ei voida varastoida.

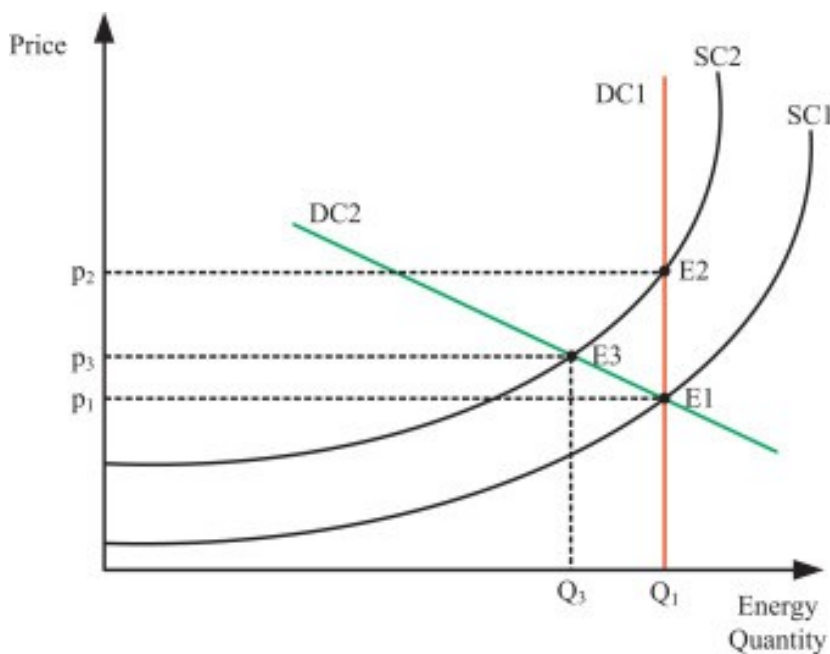
Tämän opinnäytetyön kannalta ei ole tarkoituksenmukaista tarkastella, kuinka hyvin kilpailujen markkinoiden hypoteesi pätee sähkömarkkinoilla. Pohjoismaisessa kontekstissa voidaan kuitenkin kirjallisuuden perusteella todeta markkinoiden toimivan pääsääntöisesti hyvin (Hjalmarsson 2000, Amundsen, Bergman 2006, Liski, Vehviläinen 2016), eikä siten tuottajilla ole havaittavan olevan merkittävää markkinavoimaa.

## 2.4 Sähkömarkkinoiden yleiset ongelmat: kysyntä- ja tarjontashokit

Kahden aikaisemman luvun perusteella pystymme nyt ymmärtämään sähkömarkkinoita kokonaisuutena, jossa tarjonta muodostuu asteittain eri tuotantotapojen mukaan ja jossa kysyntä on karkeasti ottaen täysin joustamatonta. Nämä kaksi asiaa johtavat markkinoiden toiminnan kannalta ongelmallisiin ilmiöihin. Aikaisemmin läpikäymäni kysynnän syklisyyden vuoksi sähkömarkkinoilla esiintyy usein kysyntäshokkeja, jolloin sähkömarkkinoiden kysyntäkäyrä siirtyy merkittävästi oikealle. Tätä kutsutaan kysynnän volatiliteetiksi (D. S. Kirschen 2003). Näin tapahtuu esimerkiksi Suomessa keskitalven kylmimpinä päivinä, jolloin kotitalouksien sähkönkulutus kasvaa merkittävästi vaaditun lisälämmityksen seurauksena. Kysynnän volatiliteetti yhdistettynä olemattomaan hintajoustoon johtaa markkinoilla siihen, että voimakkaiden kysyntäpiikkien aikana tarjontapuolella joudutaan turvautumaan kaikista korkeimman rajakustannuksen tuotantoon. Pahimmillaan voimakas kysyntäshokki voi ylittää olemassa olevan markkinakapasiteetin asettamat rajoitteet, jolloin sähkön kulutusta joudutaan säännöstelemään. Joka tapauksessa kysyntäshokin sattuessa sähkön hetkellinen hinta sähköpörssissä on korkeampi. Ilmiö kuitenkin nostaa sähkön kokonaishintaa myös kysyntäshokkien ulkopuolella, sillä sähkön kuluttajat joutuvat maksamaan sähkön vähittäismyyjille premion sähkön hinnassa niiden kantaman riskin vuoksi (D. S. Kirschen 2003). Toisaalta shokit eivät aina ole peräisin pelkästään kohonneesta kysynnästä, vaan myös tarjontapuolella tapahtuvat shokit voivat johtaa äkillisiin muutoksiin sähkön hinnassa. Huoltokatkokset suurten voimaloiden

sähköntuotannossa voivat alentaa hetkellisesti käytössä olevaa kapasiteettia, jolloin verkko on entistä haavoittuvaisempi korkealle kysynnälle. Lisäksi monet uusiutuvan energian tuotantotavat ovat riippuvaisia kulloisestakin säästä.

Yleisesti ottaen kirjallisuudessa on olemassa vahva konsensus siitä, että kysynnän joustavuuden kasvattaminen tuottaa merkittäviä hyötyjä kuluttajille (Paterakis, Erdinç et al. 2017, P. Palensky, D. Dietrich 2011, Heshmati 2014, Herter, McAuliffe et al. 2007)



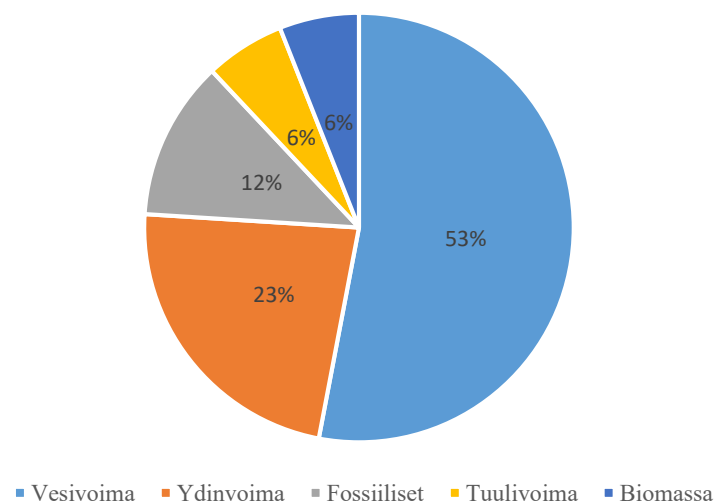
Kuva 3: Kysynnän joustavuuden kasvun vaikutus sähkön hintaan. Lähde: (Paterakis, Erdinç et al. 2017).

Oheinen Paterakiksen, Erdincin ja Catalaon tutkimuksesta sitaoitu kuva havainnollistaa, kuinka kysynnän joustavuuden kasvattaminen johtaa tarjontashokin kohdalla alhaisempaan hintaan kuin joustamattoman kysynnän tapauksessa (Kuva 3). Kysynnän ollessa joustamatonta tarjonnan supistuminen johtaa välttämättä korkeampaan hintaan, sillä tällöin joudutaan turvautumaan kalleimman rajakustannuksen tuotantoon vastaamaan entistä kysyntää. Uusi leikkauspiste (kuvassa E2) on korkeammalla kuin aikaisemmin. Kysynnän ollessa joustavaa, osa kuluttajista pienentää kulutustaan hinnan noustessa jolloin tasapaino (kuvassa E3) syntyy pienemmällä tuotantomäärällä kuin aikaisemmin.

## 2.5 Nord Pool Spot ja sen rakenne

Nord Pool Spot on yhteispohjoismaalainen sähköpörssi, jonka piiriin kuuluvat kaikki Pohjoismaat sekä Viro, Latvia ja Liettua. Nord Poolille ominaista on vesivoiman suuri osuus tuotannosta. Vuonna 2013 tuotanto jakautui lähteittäin alla olevan kuvan mukaisesti (kuva 4). Joka päivä kello 12.00 Nord Pool vastaanottaa sähkön ostajilta ja myyjiltä tarjoukset seuraavan päivän jokaiselle tunnille, joilla osapuolet ovat valmiita ostamaan ja myymään sähköä. Näistä tarjouksista lasketaan niin sanottu system price eli järjestelmähinta, joka on markkinan tasapainohinta koko sähköpörssin alueella. Nord Pool on tämän lisäksi jaettu eri maantieteellisiin alueisiin, joille lasketaan omat järjestelmän sisäiset hinnat. Esimerkiksi Suomi on yksi alue, mutta Norja on jaettu viiteen eri alueeseen. Tarjousten vastaanottamisen jälkeen Nord Pool laskee alueelliset hinnat ja jakaa alueet alijäämä- ja ylijäämä alueisiin sen mukaan, pystyykö alueellinen tuotanto vastaamaan alueelliseen kysyntään. Periaate on, että sähköä siirretään aina ainoastaan ylijäämäisiltä alueilta alijäämäisille. Mikäli siirrot alueiden välillä jäävät kantaverkon maksimaalista siirtokykyä pienemmäksi, alueelliset hinnat ovat identtiset järjestelmähinnan kanssa. Muussa tapauksessa alueellinen hinta voi poiketa järjestelmähinnasta eli ylijäämä on joko myytävä Nord Poolin ulkopuolelle tai vaihtoehtoisesti alueellinen alijäämä on ostettava Nord Poolin ulkopuolelta (Nord Pool 2017).

Sähköntuotanto lähteittäin Noordpoolissa



Kuva 4: Tuotanto energialähteittäin vuonna 2013 (NordREG 2014).

### 3. Tuotantotuet

#### 3.1 Motiivit tuulivoiman tukemiselle

Vuoden 2016 tutkimuksessaan Matti Liski ja Iiro Vehviläinen tutkivat tuulivoimatukien vaikutuksia sähkön markkinahintaan Pohjoismaissa. Heidän johtopäätöksensä oli, että tuulisähkön markkinaosuuden kasvaessa kymmeneen prosenttiin, sähkön hinta Pohjoismaiden markkinoilla puolittuu (Liski, Vehviläinen 2016). Tutkimuksessa he laskivat myös kuluttajien maksuhalukkuutta maksaa tukia uusiutuville energiantuotantotavoille, mikä on ehto täsmällisen kustannus-hyöty -analyysin tekemiselle. Kuluttajien kannalta tuulivoiman tukemisella on olemassa selvä taloudellinen kannustin.

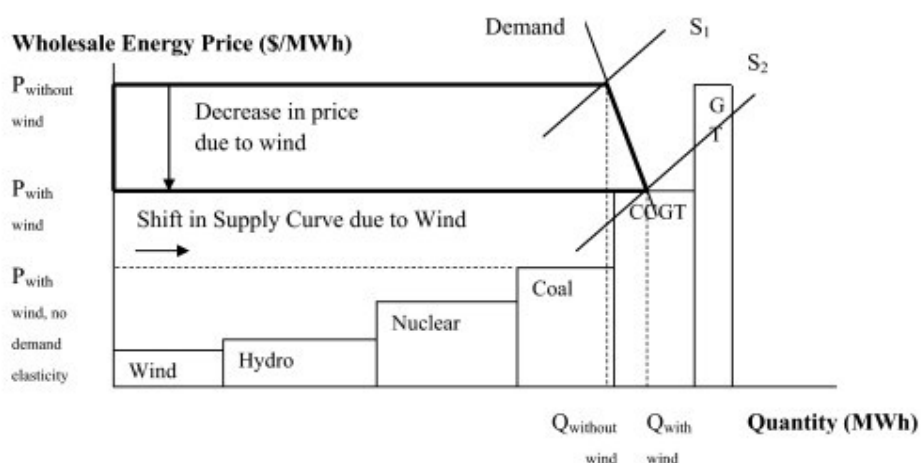
Jos tuuli- ja aurinkovoiman rajakustannukset ovat fossiilisia energianlähteitä alhaisemmat, niin sitten miksi tarvitsisimme tuotantotukia investointien saamiseksi? Mikseivät vapaat markkinat investoi alhaisemman tuotantokustannuksen energiamuotoihin? Sähkömarkkinoilla perinteisen rajakustannuksen lisäksi tunnetaan myös toinen kustannusmittari, niin sanottu ”levelized cost of electricity” eli LCOE, joka on kunkin voimalaitoksen sähköntuotannon yksikkökustannuksen diskontattu nykyarvo. Rajakustannuksesta poiketen se pitää sisällään myös voimalaitoksen investointikustannukset (Borenstein 2012). Lisäksi Borenstein (2012) korostaa, että jokaisen voimalaitoksen kustannukset ovat aina yksilöllisiä, mutta tästä huolimatta eroja syntyy myös teknologioiden välille. Käyttämällä rajakustannuksen sijaan mittarina LCOE:ta, uusiutuvien energianlähteiden kustannukset nousevat huomattavasti aikaisempaa korkeammalle. Vaaditut investoinnit voivat nousta niin suuriksi, että elinkaarensa aikana voimalaitoksessa tuotetun sähkön arvo jää alle LCOE: n, jolloin markkinoilla ei investoida tarpeeksi puhtaisiin tuotantomuotoihin. Vaikka tuuli- ja aurinkovoima ovat halpaa energiaa tuottaa voimalaitosten ollessa jo pystyssä, ne eivät ole tarpeeksi kannattavia maksaakseen investointeja takaisin.

LCOE huomioi investointikustannukset perustuen ainoastaan olemassa olevaan teknologiaan. On turvallista olettaa, että tänä päivänä tehdyt investoinnit kuitenkin nopeuttaisivat teknologista kehitystä ja investointikustannusten alenemista. Tätä kutsutaan endogeeniseksi teknologiseksi kehitykseksi (Grossman, Helpman 1994). Vaikutusta ei kuitenkaan synny alkuperäisten kustannusten ollessa liian suuria (Acemoglu, Aghion et al. 2012). Kirjallisuudessa teknologisen kehityksen yhteydessä puhutaan usein niin sanotusta ”spill over” -efektistä, jossa uudella teknologialla on positiivinen ulkoisvaikutus yhteiskunnalle (Lehmann, Gawel 2013). Eräs vaihtoehto tällöin on tukea uusiutuvia

tuotantotapoja investointien kasvattamiseksi, jotta vältetään alkuvaiheen korkeiden kustannusten aiheuttama kuoppa. Kirjallisuudessa tiedetään, että tukipolitiikalla on ollut merkittävä positiivinen vaikutus uusiutuviin energiamuotoihin liittyneiden patenttien määrissä (Johnstone, Haščič et al. 2010), mikä indikoi teknologisen kehityksen nopeutumista ja tukee olettamusta sen endogeenisestä lähteestä. Liskin ja Vehviläisen (2016) mukaan tällöin yhteiskunta ikään kuin investoi liian varhain ja liian kalliilla hinnalla puhtaaseen teknologiaan, mutta seuraukset markkinoilla kompensoivat haitat. Keskeisessä osassa kyseisessä teknologisessa varaslähdössä on subventioiden monet edut verrattuna perinteisempiin pigou-veroon ja päästökauppaan. Vertailen näiden järjestelmien välisiä eroja tarkemmin tutkielmani neljännessä osiossa. Taloudellisten kannustimien lisäksi tuotantotuille onkin olemassa myös vahva ympäristöllinen motiivi.

### 3.2 Merit order -ilmiö ja hintataso markkinoilla

Kuten aikaisemmin todettiin, sähkömarkkinoiden tarjontakäyrä kasvaa asteittain tuotantotapojen mukaan. Tuulivoimatuotannossa tuotanto on voimaloiden huoltokustannuksia lukuun ottamatta täysin ilmaista, sillä luonnonvarana tuuli ei maksa mitään. Vastaavasti fossiilisiin polttoaineisiin perustuvien tuotantotapojen rajakustannukset ovat huomattavasti korkeampia. Felderin (2011) mukaan ilmiötä, jossa pienen rajakustannuksen tuotanto syrjäyttää markkinoilta korkean rajakustannuksen tuotantoa laskien sähkön vähittäismyynnin hintaa, kutsutaan merit order -ilmiöksi. Käytännössä uusiutuvan energian tuotannon saapuminen markkinoille siirtää tarjontakäyrän eli merit



Note: CCGT denotes natural gas fired combined-cycle gas turbine; GT denotes gas turbine.

Kuva 5: Merit order -efekti. Lähde: (Felder 2011).

order -käyrän alimpia portaita oikealle, jolloin uudessa tasapainotilassa sähkön markkinahinta on aikaisempaa matalampi. Tämä voidaan ymmärtää myös siten, että lisääntynyt uusiutuva tuotanto vähentää muiden sähkön tuotantotapojen kohtaamaa kysyntää. Graafisesti ilmiötä voidaan havainnollistaa seuraavan Felderiltä (2011) sitatoidun kuvan avulla (Kuva 5). Syntyneet säästöt voivat olla hyvinkin huomattavia, sillä tarjontakäyrällä siirrytään alemmalle portaalle. Tämä leikkaa pois kaikkien tuotantotapojen voittoja.

Kirjallisuudessa ilmiötä on käsitelty niin kaikkien uusiutuvan eli RES (Renewable Energy Supply) tuotannon kautta, kuin myös pelkän tuulivoimatuotannon osalta. Cludius et. al. (2016) tutkivat lisääntyneen uusituvan tuotannon aiheuttaneita vaikutuksia Saksan sähkömarkkinoilla vuosien 2008 – 2012 aikana, ja he arvioivat markkinahinnan olleen Saksassa tuona aikana välillä 0.8 - 2.3 euroa megawattitunnilta alhaisempi jokaista markkinoille syntynyttä yhden gigawatin uusiutuneen energian tuotantokapasiteettia kohden. Kaikkea asennettua kapasiteettia kohden markkinahinta aleni lisääntyneen uusiutuvan tuotannon vuoksi 6.0 - 10.8 euroa jokaista megawattituntia kohden saman ajanjakson aikana (Cludius, Hermann et al. 2014). Saadut tulokset ovat yhdenmukaisia muiden kirjallisuuden lähteiden kanssa. Oheiseen taulukkoon on koostettu yhteen joitain kirjallisuuden tuloksia ~~yhteen~~ kuvamaan merit order -ilmiön suuruutta. Taulukoitu hinnanalennuksen kokonaisvaikutus kuvastaa sitä, paljonko markkinahinta laskee uusiutuvan energian lähteen kapasiteetin kasvaessa yhden gigawattitunnin verran.

**Taulukko 1: Merit order -efektin suuruus kirjallisuudessa**

Tutkimus	Maa	Tyyppi	Ajanjakso	Kokonaisvaikutus
(Clò, Cataldi et al. 2015, Würzburg, Labandeira et al. 2013)	Italia	Tuuli Aurinko	2005 - 2013	4.2 €/MWh (tuuli) 2.3 €/MWh (aurinko)
(Denny, O'Mahoney et al. 2017)	Irlanti	Tuuli	2009	3.40 €/MWh
(Gelabert, Labandeira et al. 2011)	Espanja	Uusiutuvat yhteensä	2005-2010	1.9 €/MWh

(Würzburg, Labandeira et al. 2013)	Saksa, Itävalta	Tuuli + aurinko		1.0 €/MWh (molemmat)
(Woo, Moore et al. 2016)	Kalifornia	Tuuli + aurinko	2012 – 2015	1.4 – 3.3 \$/MWh (tuuli)  1.9 – 5.3 \$/MWh (aurinko)
(Woo, Horowitz et al. 2011)	Teksas	Tuuli + aurinko	2007-2010	3.2 – 15.3 \$/MWh
(Sensfuß, Ragwitz et al. 2008)	Saksa	Uusiutuvat yhteensä	2001-2006	1.7 – 7.83 €/MWh

Merit order -efekti ei ole suuruudeltaan vakio, vaan se voi vuositasolla vaihdella merkittävästi. Koska markkinatasapaino voi muuttua suoraan kysynnän tai tarjonnan kautta, vuosittaiset olosuhteet markkinoilla muuttavat ilmiön suuruutta. Esimerkiksi kysyntäpiikkien aikana merit order -efekti on suurempi kuin matalan kysynnän aikana, sillä tällöin uusiutuva tuotanto korvaa korkeamman rajakustannuksen tuotantoa kuin matalan kysynnän aikana (Cludius, Hermann et al. 2014, Würzburg, Labandeira et al. 2013). Vastaavasti tarjontakäyrässä tapahtuvat muutokset vaikuttavat myös ilmiön suuruuteen. Sähköpörssin tuntiperusteinen toiminta saattaa esimerkiksi johtaa siihen, että hintojen alennus kohdistuu niille tunneille vuorokaudessa, jolloin uusiutuvien tuotantoa on saatavilla (Clò, Cataldi et al. 2015). Uusiutuvan energianlähteiden tuottajat eivät kykene optimoimaan tuotantoa kellonajan mukaan, toisin kuin perinteisemmät tuottajat. Tämän vuoksi merit order -ilmiö voi jäädä odotuksia pienemmäksi.

Sensfuß et al. suorittivat tutkimuksessaan vuonna 2008 herkkyysanalyysin, jonka mukaan Saksassa vuonna 2006 suurimmat ilmiön suuruuteen vaikuttavat tekijät ovat jo asennetun uusiutuvan tuotannon määrä, fossiilisten polttoaineiden kustannukset, sekä hiilidioksidipäästöjen kustannukset. Tulokset ovat loogisia, sillä valmiiksi suuri asennettu uusiutuvien energianlähteiden kapasiteetti tarkoittaa sitä, että kaikista kallein tuotanto on jo korvattu markkinoilla edullisemmalla tuotannolla. Polttoainekustannukset ja päästöoikeuksien hinnat puolestaan vaikuttavat suoraan tarjontakäyrän

oikean laidan jyrkkyyteen. Mitä kalliimpaa tuotantoa markkinoilla on, sitä suuremmat ovat kuluttajien säästöt uusiutuvien energianlähteiden tullessa markkinoille.

Vuosittaisen vaihtelun lisäksi ilmiö on erisuuruinen myös eri markkina-alueiden välillä. Tämä johtuu siitä, että sähkömarkkinat eroavat toisistaan niin kysynnän, kuin olemassa olevan tarjonnan kautta. Myös kirjallisuudessa käytetty yhdenmukainen tapa laskea säästöt megawattituntia kohden uusiutuvien tuotanto kasvaessa yhden gigawatitunnin verran, vaikuttaa eroihin markkina-alueiden välillä. Pienillä markkinoilla yhtä gigawattituntia vastaava tuotanto voi olla merkittävä osuus koko järjestelmän tuotannosta, mikä kasvattaa estimoituja arvoja (Würzburg, Labandeira et al. 2013). Saadut tulokset voivat vaihdella myös tutkijoiden käyttämien erilaisten ekonometrian empiiristen mallien ja simulaatiomallien vuoksi. Tämän tutkielman kannalta merkityksellistä on kuitenkin vain se, että viimeisin taloustieteellinen kirjallisuus ja empiiriset tutkimukset tukevat vahvasti tulkintaa, että uusiutuviin energianlähteisiin perustuva sähköntuotanto laskee markkinahintaa ceteris paribus. On selvää, että tuulivoimatukien hyödyllisyyttä analysoitaessa tulee huomioida niiden aiheuttamat säästöt sähkömarkkinoilla.

### 3.4 Kuluttajien maksuhalukkuus ja tukien kannattavuus

Tuulivoimatuet laskevat sähkön hintaa, mutta kuluttajien ja veronmaksajien kannalta se ei yksissään tee tukien maksamisesta kannattavaa. On selvää, että mikäli tukiin käytetään enemmän rahaa kuin ne laskevat sähkön hintaa, kyseessä ei olisi kuluttajille taloudellisessa mielessä hyödyllinen järjestelmä.

**Table 7**

TWh	10	20	30	40	50
DEN	25	10	6	4	3
FIN	54	23	13	8	5
NOR	88	37	21	13	9
SWE	103	43	24	15	10
Total	271	114	64	40	27

Consumer-side willingness to pay for MWh of wind generation: annual expenditure reduction (in 2010 euros) divided by the cumulative addition of wind generation (MWh), start from zero. Mean values reported.

Kuva 6: Pohjoismaalaiset maksuhalukkuudet per MWh (Liski, Vehviläinen 2016).



Liski ja Vehviläinen (2016) laskivat tutkimuksessaan pohjoismaisten kuluttajien maksuhalukkuuden tukea jokaista uutta megawattituntia vastaava tuulivoimatuotantoa kohden ilman kuluttajien budjettirajoitetta. Maksuhalukkuus tarkoittaa tässä yhteydessä sitä määrää, jolla lisääntynyt yhden megawattitunnin tuotanto kasvattaa markkinoilla kuluttajien ylijäämää. Erona aikaisemmin mainittuihin kirjallisuuden tuloksiin merit order -ilmiön suuruudesta on se, että tässä ilmiön hyöty lasketaan jokaista tuulivoimatuotannon megawattituntia kohden, eikä yleistä hinnan alennusta vanhasta markkinatasapainosta. Tämä mahdollistaa vertailun maksettuihin tuotantotukiin. Liskin ja Vehviläisen (2016) mukaan pohjoismaalaiset kuluttajat ovat valmiita maksamaan yhteensä 271 euroa megawattitunnilta ensimmäisen kymmenen terawattitunnin lisätuotannolle. Maakohtaiset luvut löytyvät heidän laatimastaan taulukosta (Kuva 6).

Suomessa käytössä oleva syöttötariffijärjestelmä takaa tuottajille 83.50 euron hinnan megawattitunnilta, jolloin tuottajille maksettava tuki on takuuhinnan ja voimalaitoksen kolmen kuukauden markkinahinnan keskiarvon välinen erotus (*Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta*. 2010). Suomessa tuen enimmäismääräksi on kuitenkin asetettu 53.50 euroa megawattitunnilta. Ruotsissa ja Norjassa tukien maksamiselle on luotu syöttötariffijärjestelmästä täysin poikkeava yhteinen järjestelmä. Ruotsin ja Norjan tuotantotuet maksetaan markkinaperusteisilla vihreillä sertifikaateilla, joita myönnetään tuulivoiman tuottajille. Tuottajat voivat myöhemmin myydä nämä sertifikaatit markkinoilla niille osapuolille, jotka Ruotsin ja Norjan valtiot ovat määränneet ostamaan niitä perustuen yhtiöiden tuottamaan tai kuluttamaan sähköön (Swedish Energy Agency 2017). Järjestelmän kustannukset kuluttajille ovat vaihdelleet molemmissa maissa noin 20-30 euron välillä per megawattitunti.

Liskin ja Vehviläisen (2016) laskelmat osoittavat tuulivoimatuukien olleen pohjoismaisille kuluttajille vaikutuksiltaan positiiviset. Tuotannon tukemisella on kuitenkin laskeva rajahyöty, sillä lisääntynyt tuulivoimatuotanto syrjäyttää ajan myötä aina halvempaa tuotantoa kuin aikaisemmin. Liski ja Vehviläinen (2016) kuitenkin arvioivat kuluttajien hyötyvän järjestelmästä vielä vähintään 20 terawattituotannon lisäämiseen saakka. Suomalaisessa kontekstissa voidaan kuitenkin todeta, että sähköpörssin markkinahinnan laskiessa maksettu tuki jokaista megawattituntia kohden tulee nousemaan lähelle korkeinta mahdollista eli 53,50 euroa/MWh rajaa. Mikäli tuki pysyy näin korkeana myös tulevaisuudessa, muuttuu järjestelmä mahdollisesti epäedulliseksi suomalaisten kuluttajien kannalta. Koska sähkömarkkinat ovat pohjoismaissa linkittyneet yhteen, jokainen maa saa etua myös muualla tuotetusta tuulivoimasta. Maksuhalukkuudet on askellettu per lisääntynyt tuotanto yhteensä pohjoismaissa, joten Suomessa maksetun tuen tulisi muuttua suhteessa kaikkiin Pohjoismaihin asennettuun tuotantoon.

Tuulivoimatukien (ja muiden uusiutuvien energianlähteiden) kannattavuutta on laskettu myös muualla Euroopassa. Esimerkiksi Italiassa tuulivoiman tukeminen oli vuosien 2009-2013 välillä kuluttajien kannalta järkevää johtaen noin 1.3 miljardin euron kasvuun kuluttajien ylijäämässä (Clò, Cataldi et al. 2015). Kuitenkin samassa tutkimuksessa Cataldi et al. saivat täysin päinvastaisen tuloksen aurinkoenergian tukemisen osalta, jossa tuet johtivat kuluttajien ylijäämän pienemiseen yli kahdeksalla miljardilla eurolla. Erot tuotantotapojen välillä selittyvät paljolti sillä, että Italiassa aurinkosähkö on huomattavasti tuulivoimaa yleisempää. Italiassa aurinkosähkön tuotantoa on myös tuettu avokätisesti syöttötariffijärjestelmällä niin sanotun Conto Energia -mallien puitteissa. Tuulivoimatuotantoa tuetaan monimutkaisemmin käyttäen yhdistellen sekä sertifikaatteja että syöttötariffia.

Espanjan sähkömarkkinoilla on tutkittu paljon tukijärjestelmien kannattavuutta ja useat tutkimukset ovat päätyneet samankaltaisiin tuloksiin kuin Italiassa. Esimerkiksi Gil et al. (2012) selvittivät vuosien 2007 – 2010 aikana kuluttajien nettohyötyneen 2.12 miljardia euroa lisääntyneestä tuulivoimatuotannosta. Samankaltaiseen tulokseen päätyivät myös de Miera et al. jo vuonna 2008. Heidän mukaansa tuulivoimatukien nettosäästöt olivat kuluttajille vuosina 2005 – 2007 yhteensä yli 2.1 miljardia euroa.

Aikaisempia tuloksia Espanjasta voidaan pitää luotettavina, vaikka kirjallisuudessa on päädytty myös vastakkaisiin lopputuloksiin. Vuonna 2011 tehdyn tutkimuksen mukaan kaikki uusiutuville ja lämpövoimalaitoksille maksetut tuet olivat Espanjassa vuonna 2009 noin 4.6 miljardia euroa kun taas merit order -ilmiö toi vuosien 2005 – 2010 aikana keskimäärin vain noin 477 miljoonan euron vuosittaiset säästöt kuluttajille (Gelabert, Labandeira et al. 2011). Kuluttajille tämä tarkoittaa yli neljän miljardin euron vähennystä ylijäämässä. Syynä on Espanjan tukijärjestelmässä, jossa uusiutuvien energian tuottajille maksetaan markkinahinnan päälle syöttöpremio, joka aurinkosähkön osalta oli peräti 429.33 €/MWh vuonna 2009. Tuulisähkölle maksettu tukipremio oli suuruudeltaan samana vuonna ainoastaan kymmenes tästä ollen 48.21 €/MWh. Massiivisen eron vuoksi yli puolet vuoden 2009 tukisummasta maksettiin aurinkosähkön tuottajille (Gelabert, Labandeira et al. 2011). Niin Espanjan kuin Italiankin tulokset korostavat tukijärjestelmien oikean kalibroinnin olevan tärkeää positiivisten lopputuloksen saamiseksi. Liian anteliaat tuet voivat ylittää helposti merit order -ilmiön tuottaman säästön kuluttajille.

## 4. Vertaileva analyysi

### 4.1 Päästökauppa ja hiilivero

Talousteoriasta tiedämme, että ulkoishaitat syntyvät tilanteessa, kun yksityisen toimijan kohtaama kustannus on alhaisempi kuin toiminnasta aiheutuva kustannus yhteiskunnalle. Pigou-vero eli haittaveron tarkoittaa haitallisesta toiminnasta kannettavaa veroa, jonka sääntelijä asettaa vastaamaan ulkoishaitan suuruutta. Näin vero saattaa saastuttamisen haitan osaksi yksityisen toimijan kustannuksia (Lans Bovenberg, Goulder 2002). Vaihtoehtoinen menetelmä on vaikuttaa suorien kiintiöiden kautta, jolloin julkinen taho myöntää tai huutokauppaa saastuttaville tahoille päästöoikeuksia, joilla päästöjen määrä pidetään jälleen yhteiskunnalle optimaalisella tasolla (Lans Bovenberg, Goulder 2002). Lopputulos on molemmissa sama, mutta verolla siihen päädytään vaikuttamalla hintoihin ja kiintiöillä määriin. Sähkömarkkinoiden kannalta relevantin päästö on hiilidioksidi, jota syntyy poltettaessa fossiilisia raaka-aineita. Veron etuna ilmaisiin kiintiöihin verrattuna on se, että tällöin valtio pystyy rahoittamaan saamallaan tuotolla esimerkiksi muiden verojen laskua. Vastaava hyöty saadaan kiintiöstä vain, mikäli ne huutokaupataan saastuttajille (Lans Bovenberg, Goulder 2002).

Kirjallisuudesta tiedämme myös, että epävarmuus saastuttamisen kustannuksesta vaikuttaa järjestelmien keskinäiseen paremmuuteen. Gideon Fishelson osoitti jo vuonna 1976, että mikäli päästöjen rajakustannus on suurempi kuin niiden rajahyöty, ovat kiintiöiden odotusarvoiset kustannukset alhaisemmat kuin haittaverotuksen. Vero puolestaan on edullisempi järjestelmä, jos asia on päinvastoin (Fishelson 1976). Tämä voidaan havainnollistaa sillä, että erittäin haitallisten päästöjen kohdalla on odotusarvoisesti kannattavampaa valita kiintiöt suoraan kuin käyttää veroa. Euroopan unionissa on päädytty juuri tähän ratkaisuun, ja unioni muodostaakin tällä hetkellä maailman suurimman päästökauppa-alueen. Nykyinen päästökauppa-kausikattaa vuodet 2013 – 2020. Päästöoikeudet myönnetään huutokaupan perusteella, minkä jälkeen oikeuksilla käydään kauppaa omilla markkinoilla (The EU Emissions Trading System (EU ETS) 2016).

Tähän mennessä olen pitkälti käsitellyt uusiutuville energianlähteille maksettua tukia puhtaasti taloudellisissa kontekstissa. Tukia voidaan kuitenkin käsitellä myös ympäristönäkökulmasta, sillä uusiutuvat energianlähteet syrjäyttävät useimmiten markkinoilta saastuttavampaa fossiilisiin energianlähteisiin perustuvaa tuotantoa. Mikäli sääntelijä asettaa kuitenkin tavoitteekseen vähentää hiilidioksidipäästöjä, voidaan uusiutuvalle tuotannolle maksetut tuet nähdä vaihtoehtona

ulkoishaittojen kontrolloinnissa perinteisemmille metodeille kuten pigou-verolle ja päästökaupalle. Järjestelmiä voidaan verrata sekä niiden tuottamien taloudellisten että ympäristöllisten vaikutusten kautta. On kuitenkin huomioitava, että sähkömarkkinoilla syrjäytynyt tuotanto ei välttämättä ole sellaista, jolle saastuttamisen rajahyöty on alhaisin. Tämä poikkeaa markkinamekanismeihin perustuvasta pigou-verosta ja päästökaupasta, joissa yritykset, joille päästöistä luopuminen on edullisinta, myyvät päästöoikeuksia niille, joille se on kalliimpaa. Tuotantotukien kohdalla sähkömarkkinoilla lopputulos ei kuitenkaan eron vuoksi ole välttämättä pareto-optimaalinen. Täydellinen tehokkuus on kuitenkin mahdollista saavuttaa eräänlaisella hybridimallilla, jossa hiilivero tai päästökauppajärjestelmä nostaa saastuttavien voimalaitosten rajakustannuksia.

Aikaisemmin totesin, että sähkömarkkinoiden kysynnän hintajousto on lähes olematonta, ja tarjonnan hintajousto on tätä suurempi. Kun julkinen valta asettaa sähkömarkkinoilla tuottajille ylimääräisen kustannuksen, olkoon se vero tai maksullinen kiintiö, seurauksena on klassinen verotuksen kohtaanto-ongelma, jossa tuottajat pystyvät vyöryttämään kustannukset lähes kokonaan kuluttajien maksettavaksi. Euroopan unionin alueella päästökaupan kustannusten kohtaantoa on laskettu mm. Fabran ja Reguantin (2013) tutkimuksessa koskien Espanjan sähkömarkkinoita. Heidän tulostensa mukaan keskimäärin noin 80% päästökaupan kustannuksista valuu suoraan sähkön markkinahintoihin. Kysyntäpiikkien aikana tämä kasvaa jopa 100% suuruiseksi. Saksan sähkömarkkinoilla on saatu vastaavanlaisia tuloksia. Vuonna 2017 tehdyn tutkimuksen mukaan päästökaupan kustannuksista keskimäärin 60% siirtyi sellaisenaan sähkön markkinahintaan (Duso, Szücs 2017). On turvallista olettaa, että tulos olisi ollut samanlainen, vaikka käytössä olisi ollut hiiliverojärjestelmä päätöskäupan sijaan. Tärkeää on huomata, että päästökauppajärjestelmällä on päinvastainen vaikutus sähkömarkkinoiden hintatasoon kuin uusiutuville energiamuodoille maksetuilla tuotantotuilla.

Liskin ja Vehviläisen (2016) tutkimuksessa todetaan, että nämä kaksi järjestelmää toimivat eri suuntiin toisiinsa nähden: tuulivoimalle maksetut tuet pienentävät markkinapohjaisen päästökaupan hintoja nostavaa vaikutusta. Vaikka tämä vähentää päästökaupan luomia markkinapohjaisia kannustimia investoida tuulivoimaan, tuulivoimatuet itsessään kompensoivat sitä. Päästökauppaa voidaan kuitenkin käyttää apuna saavuttamaan ympäristön kannalta tehokkaampi subventiojärjestelmä uusiutuville energiamuodoille, kuten aikaisemmin totesin. Juuri tähän lopputulokseen on päädytty myös kirjallisuudessa, joskin eri näkökulmasta. Esimerkiksi Lehmanin ja Gawelin mukaan R&D -investointien positiiviset ulkoisvaikutukset johtavat siihen, että päästökaupalla ja haittaverotuksella ei voida saavuttaa tarpeeksi nopeaa teknologista kehitystä, minkä

vuoksi ne tarvitsevat toimiakseen uusiutuville energiamuodoille maksettuja tuotantotukia (Lehmann, Gawel 2013). Molemmat järjestelmät ikään kuin tarvitsevat toisiaan toimiakseen tehokkaasti.

Mitä syvempää merkitystä tukien ja markkinapohjaisten ratkaisujen välillä sitten on? Tilanteessa, jossa vain osa maailmantaloudesta ryhtyy sääntelemään haitallisia päästöjä tavalla tai toisella, on mahdollista, että osa teollisuustuotannosta pakenee lisääntyneitä kustannuksia muualle. Kirjallisuudessa ilmiö tunnetaan nimellä ”carbon leakage” (Babiker 2005) eli vapaasti suomennettuna nimellä hiilivuoto. Perusajatus on, että energiaiintensiivistä tuotantoa siirtyy sääntelyä lisänneistä kehittyneistä talouksista vähemmän kehittyneisiin maihin, joissa vastaavia rajoituksia ei ole. Babikerin (2005) mukaan energiaiintensiivisessä teollisuustuotannossa ilmiön suuruus voi globaalisti olla jopa välillä 50% – 130%. On tärkeää huomata, että hiilivuoto ei pelkästään kasvata päästöjärjestelmän kustannuksia kehittyneissä talouksissa, vaan se myös kasvattaa niiden maiden päästöjä, jotka jäävät järjestelmän ulkopuolelle, vesittäen näin osan tavoitelluista päästövähennyksistä.

Ääriesimerkissä maailman kokonaispäästöt saattavat jopa kasvaa kiristyneen sääntelyn vuoksi. Sinn kutsui tätä vuoden 2008 artikkelissaan ”vihreäksi paradoksiksi”. Hän perusteli tätä osoittamalla matemaattisesti (tietyin oletuksin), että odotukset päästöhintojen noususta lisäävät päästöjä nykyhetkenä. Tulos on johdettu suoraan ympäristötaloustieteessä klassikon asemaan päässeestä Hotellingin säännöstä, jonka mukaan ei-uusiutuvat luonnonvarat ovat yksi pääoman muodoista, ja että näiden resurssien nykyarvon tulee olla yhtä suuri kuin niiden diskontattu arvo tulevaisuudessa (Hotelling 1931). Säännön totuudenmukaisuutta on kuitenkin epäilty, ja esimerkiksi vuoden 2014 empiirisessä katsauksessaan Cairns totesi vihreän paradoksin pitävän huonosti paikkaansa jo pelkästään teknologisen kehityksen vuoksi. Vastoin Hotellingin sääntöä hiilivuodon ei ole myöskään havaittu suurenevan, kun sääntelyä kasvatetaan asteittain (Eichner, Pethig 2011).

Vertailua tehtäessä uusiutuvan energian tuotannon tukeminen osoittautuu hyväksi vaihtoehdoksi verrattuna pigou-veroon tai päästökauppaan. Kahdessa jälkimmäisessä järjestelmässä kustannukset vyörytetään lähes kokonaan kuluttajien maksettavaksi korkeamman sähkön hinnan muodossa. Hiilivuodon vuoksi päästöjärjestelmän kustannukset myös nousevat maissa, jotka implementoivat järjestelmät talouksiinsa. Samalla osa asetetuista päästötavoitteista jää saavuttamatta.

## 4.2 Kustannukset tuottajapuolella

Sähkön markkinahinnan lasku kasvattaa kuluttajien ylijäämää markkinoilla, mutta vastaavasti se pienentää tuottajien voittoja vähentämällä markkinahinnan ja rajakustannuksen välistä erotusta eli katetta. Tuottajien kokema tappio vastaa likipitään kuluttajien saamaa hyötyä (Liski, Vehviläinen 2016). Yksittäiselle tuottajalle kustannus on sitä suurempi, mitä alhaisempi kyseisen voimalaitoksen rajakustannus on ollut. Pohjoismaisessa kontekstissa tämä on tarkoittanut käytännössä sitä, että suurimman osan kustannuksista maksavat vesivoiman tuottajat etenkin Ruotsissa ja Norjassa (Liski, Vehviläinen 2016). Luonnollisesti häviäjiä ovat myöskin ne tuottajat, joiden tuotanto poistuu markkinoilta, ja jotka siten menettävät tuotantoon sitoutuneen pääomansa. Liski ja Vehviläinen kuitenkin huomauttavat, ettei tällä tulisi olla vertailussa merkitystä, sillä vastaava varallisuuden tuhoutuminen tapahtuu myös muissa päästöjärjestelmissä.

Koska kuluttajapuoli saa kaiken hyödyn järjestelmästä, voidaan tukien maksamista pitää eräänlaisena tulonsiirtona tuottajilta kuluttajille. Tämä on päinvastainen lopputulos verrattuna päästökauppaan tai hiiliverotukseen, joissa kustannus puhtaampaan tuotantoon siirtymisestä lankeaa kokonaan kuluttajille.

## 4.3 Volatiliteetti markkinoilla

Sähkön tuotantotavat voidaan karkeasti jakaa ajoittaisiin ja ohjattuihin tuotantotapoihin. Esimerkiksi tuulivoima ja aurinkovoima ovat ajoittaisia tuotantotapoja, sillä niiden tuotantomäärät ja ajankohdat ovat täysin riippuvaisia säätilan eksogeenisestä muuttujista, kuten tuulennopeudesta ja auringonpaisteesta. Perinteisemmät tuotantotavat, kuten vesivoima ja lauhdetuotanto, sen sijaan ovat ohjattua tuotantoa, sillä nämä voimalaitokset voidaan sulkea tai käynnistää perustuen ainoastaan niiden taloudelliseen kannattavuuteen (Joskow 2011). Tämän fundamentaalisen eron vuoksi uusiutuvien energianlähteiden saapuminen sähkömarkkinoille ei vaikuta pelkästään hintatasoon, vaan se kasvattaa myös hinnan volatiliteettia markkinoilla (Winkler, Gaio et al. 2016). Teksasin alueellisilla sähkömarkkinoilla volatiliteetin kasvu oli suurinta niillä osa-alueilla, joissa hinnan alentuminen oli suurinta (Woo, Horowitz et al. 2011). Myös Italian sähkömarkkinoilla on empiirisesti todettu volatiliteetin kasvavan. Siellä aurinko- ja tuulivoiman muutokset volatiliteetit kasvoivat 0.67 ja 0.76 prosenttia (Clò, Cataldi et al. 2015). Hinnan volatiliteetin kasvu on tarkemmin sanottuna seurausta tarjontakapasiteetin varianssin kasvusta.

Hintatason ja sen vaihtelun kasvu lisäävät haitallisten kysyntä- ja tarjontashokkien kustannuksia kuluttajille sekä riskiä verkon toimintavarmuudessa. Laskenut markkinahinta vähentää investointien kannustimia ohjattuun tuotantoon eli niin sanottuun ”perusvoimaan”. Mikäli hypoteettinen kysyntäshokki sattuisi osumaan juuri silloin kun uusiutuvien tuotanto on alhaisella tasolla, voi sähköverkon kantokyky olla koetuksella. Mikäli kysyntä myös ylittää hetkellisesti tarjonnan, on vaarana, että verkko kaatuu jännitteen kadotessa. Muutokset tuotantorakenteessa tulee huomioida entistä tarkemmin tulevaisuudessa (Grohnheit, Andersen et al. 2011). Tämä voi tapahtua panostamalla sähkömarkkinoiden kulutuspuolen hallintaan ja investoimalla älykkäisiin sähköverkkoihin (P. Palensky, D. Dietrich 2011).

Liskin ja Vehviläisen (2016) mukaan uusiutuvien mukaantulo markkinoille kuitenkin todellisuudessa kasvattaa markkinoiden ennakointikykyä, sillä sään ennustamisen pitää sisällään ainoastaan idiosynkraattisen riskin liittyen säätilaan, toisin kuin fossiilisiin polttoaineisiin perustuva tuotanto, joihin liittyvä riski on enemmän systemaattista. Toisin sanoen sään ennustaminen on helpompaa kuin esimerkiksi polttoaineiden hintakehityksen. Ennustettavuuden kasvun on ennustettu tuovan merkittäviä säästöjä sähkömarkkinoilla (Girard, Laquaine et al. 2013).

#### 4.4 Erot subventiojärjestelmissä

Syöttötariffijärjestelmä on Euroopan unionin maissa yleisin tapa subventoida uusiutuvien energianlähteiden tuotantoa (Kitzing, Mitchell et al. 2012). Tukijärjestelmissä on eroavaisuuksia, mutta pääosin niiden tehokkuus riippuu maksettujen subventioiden oikeasta kalibroinnista. Eroja syntyy kuitenkin myös fiskaalisessa mielessä. Saksassa tuulivoiman syöttötariffijärjestelmän rahoittavat suoraan sähkön kuluttajat, jotka maksavat kustannukset sähkön siirtolaskun yhteydessä. Tämä poikkeaa merkittävästi suomalaisesta järjestelmästä, jossa tuulivoimatuet maksetaan muiden yritystukien tavoin suoraan valtion budjetista (National action plans - Energy - European Commission). Suomessa toteutettu ratkaisu johtuu perustuslakivakiokunnan ottamasta kannasta vuonna 2010, jonka mukaan veroluontoisia maksuja ei voi jättää perittäväksi yksityisille yrityksille (*Perustuslakivakiokunnan lausunto 37/2010*). Erona Saksan järjestelmään on se, että nyt syöttötariffijärjestelmän suurimmat hyötyjät eli sähkön kuluttajat eivät itse rahoita subventioita, vaan ne rahoitetaan valtion verotuloilla.

Sähkön siirron yhteydessä perityt subventiot ovat kysynnän hintajouston ja merit order -efektin vuoksi verotuksellisesti neutraaleja, toisin kuin valtion keskimäärin perimät verot. Kirjallisuudessa valtion yleisimpien verojen hyvinvointitappioiden marginaalikustannuksiksi on arvioitu välille 17 –

56 prosenttia riippuen verotyypistä (Ballard, Shoven et al. 1985). Ruotsin kaltaisessa pienessä avotaloudessa luvut asettuvat puolestaan välille 22 – 66 prosenttia (Sørensen 2014). Mikäli Suomen vastaavat luvut ovat likipitäen Ruotsin tasolla ja syöttötariffisubventiot rahoitettaisiin pienimmän marginaalikustannuksen verolla eri arvonlisäverolla, olisi jokaisen subventoidun megawattitunnin todellinen kustannus veronmaksajille 1.22 kertainen. Voidaankin tehdä karkea olettaus, että verotuksella rahoitettu syöttötariffijärjestelmä pienentää Suomessa subventioista saatuja hyötyjä.

Suomen esimerkki osoittaa hyvin, kuinka jopa pienetkin erot tukijärjestelmissä voivat aiheuttaa suuriakin vaikutuksia saatuihin hyötyihin. Sääntelijöiden Euroopassa ja maailmalla tulisikin kiinnittää erityistä huomiota myös tukijärjestelmien epäsuoriin vaikutuksiin. Esimerkiksi Suomessa eräs tapa korjata kohdattu ongelma voisi olla nykyisen sähkön siirron yhteydessä perityn sähköveron korottaminen. Korvamerkitsemällä tuotot syöttötariffin kustannuksille toisivat suomalaista mallia lähemmäksi Saksan järjestelmää. Toki fiskaalisesti tällöin tulisi myös laskea muuta verotusta vastaavalla määrällä.



## 5. Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa olen selvittänyt, kuinka tuulivoimalle ja muille uusiutuville energianlähteille maksetut tuotantotuet laskevat sähkömarkkinoiden hintaa ja missä olosuhteissa vaikutus on nettopositiivinen kuluttajille.

Sähkömarkkinoilla kysynnän on todettu olevan lähes joustamatonta (Labandeira, Labeaga et al. 2017) ja tarjontakäyrän olevan asteittain nouseva suora, jossa jokainen porras kuvaa kunkin tuotantotavan asennettua kapasiteettia ja rajakustannusta (Salvadore 2010). Kysyntä- ja tarjontakäyrien ominaisuuksien seurauksena uusiutuville energiamuodoille maksetut tuotantotuet laskevat sähkömarkkinoiden hintatasoa niin kutsutun merit order -efektin kautta, mutta samalla kasvattaen tuotannon varianssia (Woo, Horowitz et al. 2011).

Pohjoismaissa jo 10% uusiutuvien energiamuotojen markkinaosuus puolittaa sähkön hinnan markkinatasapainossa (Liski, Vehviläinen 2016), mikä ylittää huomattavasti maksettujen tukien määrän. Syntyneen kustannuksen maksavat sähkömarkkinoiden tuottajat. Tukijärjestelmien anteliaisuudesta riippuen seuraukset voivat kuitenkin olla myös kuluttajille negatiivisia (Gelabert, Labandeira et al. 2011). Julkisessa keskustelussa tulisikin huomioida entistä enemmän subventioiden positiiviset markkinatason vaikutukset kuluttajien kannalta. Myös tukien suunnitteluun ja optimointiin tulee kiinnittää aikaisempaa enemmän huomiota. Pienetkin muutokset ovat tärkeitä, jotta julkinen hyväksyntä maksetuille tuille säilyy.

Päästökauppa ja hiilivero ovat perinteisimmät politiikkametodit ilmastomuutoksen ulkoisvaikutusten kontrolloinnissa. Tällöin kustannukset kuitenkin maksaa kuluttaja, sillä kysynnän joustamattomuuden vuoksi tuottajat pystyvät vyöryttämään lisäkustannukset lähes kokonaan sähkön hintaan (Fabra, Reguant 2013). Lisäksi hiilivuotona tunnettu ilmiö johtaa siihen, että päästökaupan ja hiiliverotuksen myötä osa energiaintensiivisestä teollisuustuotannosta siirtyy talousalueille, joissa vastaavaa sääntelyä ei ole (Babiker 2005). Seurauksena on lisäkustannuksia implementoiduista järjestelmistä ja ennakoitua pienemmät päästöleikkaukset.

Tuotantotuet sen ovat kuluttajille edullinen tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä. Kirjallisuudessa on esitetty, että tietyin oletuksin päästökauppa (hiilivero) vaatii toimiakseen uusiutuville maksettuja tuotantotukia (Lehmann, Gawel 2013). Seuraavan päästökauppakierroksen alkaessa Euroopassa tulisikin kiinnittää entistä enemmän huomiota tuotantosubventioiden ja päästökaupan yhteisvaikutuksiin. Tämä mahdollistaa molempien kalibroinnin siten, että ne tukevat toinen toisiaan aikaisempaa paremmin.

Kandidaatintyöni lopuksi haluan todeta, että kirjallisuudessa ei tähän päivään mennessä ole tutkittu tarpeeksi tuuli- ja aurinkovoimatukien vaikutuksia niiden pelkkien päästövähennysten kannalta. Toisin kuin päästökauppa tai hiilivero, tukijärjestelmä takaa markkinoilta poistuvan tuotannon olevan sellaista, jolle saastuttamisen luopumisen rajakustannus on kaikista korkein tai saastuttamisen rajahyöty suurin. Useimmissa tutkimuksissa oletetaan mekanismin vähentävän päästöjä, mutta jätetään huomioimatta se, tulevatko ne oikeista voimalaitoksista. Tämä pienelle huomiolle jätetty seikka on helppo kritiikin kohde toimivallekin tukijärjestelmälle.

## Lähdeluettelo

Swedish Energy Agency-07-03, 2017-last update. Available: <http://www.energimyndigheten.se/en/sustainability/the-electricity-certificate-system/> [13.09., 2017].

The EU Emissions Trading System (EU ETS)-11-23T07:50:51+01:00, 2016-last update. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/ets\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en) [Sep 13, 2017].

*Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta*. 2010. Oikeusministeriö, Edita Publishing Oy.

National action plans - Energy - European Commission. Available: [/energy/en/topics/renewable-energy/national-action-plans](#) [Sep 13, 2017].

*Perustuslakivaliokunnan lausunto 37/2010*.

A. K. DAVID and FUSHUAN WEN, 2000 Strategic bidding in competitive electricity markets: a literature survey, *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134)* 2000, pp. 2173 vol. 4.

ACEMOGLU, D., AGHION, P., BURSZTYN, L. and HEMOUS, D., 2012. The Environment and Directed Technical Change. *American Economic Review*, **102**(1), pp. 131-166.

AMUNDSEN, E.S. and BERGMAN, L., 2006. Why has the Nordic electricity market worked so well? *Utilities Policy*, **14**(3), pp. 148-157.

AZOFRA, D., JIMÉNEZ, E., MARTÍNEZ, E., BLANCO, J. and SAENZ-DÍEZ, J.C., 2014. Wind power merit-order and feed-in-tariffs effect: A variability analysis of the Spanish electricity market. *Energy Conversion and Management*, **83**, pp. 19-27.

BABIKER, M.H., 2005. *Climate change policy, market structure, and carbon leakage*.

BALLARD, C.L., SHOVEN, J.B. and WHALLEY, J., 1985. General Equilibrium Computations of the Marginal Welfare Costs of Taxes in the United States. *American Economic Review*, **75**(1), pp. 128.

BESSEC, M. and FOUQUAU, J., 2008. The non-linear link between electricity consumption and temperature in Europe: A threshold panel approach. *Energy Economics*, **30**(5), pp. 2705-2721.

BORENSTEIN, S., 2012. The Private and Public Economics of Renewable Electricity Generation. *Journal of Economic Perspectives*, **26**(1), pp. 67-92.

BORENSTEIN, S., 2000. Understanding Competitive Pricing and Market Power in Wholesale Electricity Markets. *The Electricity Journal*, **13**(6), pp. 49-57.

- CLÒ, S., CATALDI, A. and ZOPPOLI, P., 2015. The merit-order effect in the Italian power market: The impact of solar and wind generation on national wholesale electricity prices. *Energy Policy*, **77**, pp. 79-88.
- CLUDIUS, J., HERMANN, H., MATTHES, F.C. and GRAICHEN, V., 2014. The merit order effect of wind and photovoltaic electricity generation in Germany 2008–2016: Estimation and distributional implications. *Energy Economics*, **44**, pp. 302-313.
- D. S. KIRSCHEN, 2003. Demand-side view of electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, **18**(2), pp. 520-527.
- DENNY, E., O'MAHONEY, A. and LANNOYE, E., 2017. Modelling the impact of wind generation on electricity market prices in Ireland: An econometric versus unit commitment approach. *Renewable Energy*, **104**, pp. 109-119.
- DUSO, T. and SZÜCS, F., 2017. *Market power and heterogeneous pass-through in German electricity retail*.
- EICHNER, T. and PETHIG, R., 2011. Carbon Leakage, the Green Paradox, and Perfect Future Markets. *International Economic Review*, **52**(3), pp. 767-805.
- ESPEY, J.A. and ESPEY, M., 2004. Turning on the Lights: A Meta-Analysis of Residential Electricity Demand Elasticities. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, **36**(1), pp. 65-81.
- FABRA, N. and REGUANT, M., 2013. *Pass-through of Emissions Costs in Electricity Markets*. w19613. National Bureau of Economic Research.
- FELDER, F.A., 2011. *Examining Electricity Price Suppression Due to Renewable Resources and Other Grid Investments*.
- FISHELSON, G., 1976. *Emission control policies under uncertainty*.
- GELABERT, L., LABANDEIRA, X. and LINARES, P., 2011. *An ex-post analysis of the effect of renewables and cogeneration on Spanish electricity prices*.
- GENC, T.S., 2016. Measuring demand responses to wholesale electricity prices using market power indices. *Energy Economics*, **56**, pp. 247-260.
- GIRARD, R., LAQUAINE, K. and KARINIOTAKIS, G., 2013. *Assessment of wind power predictability as a decision factor in the investment phase of wind farms*.
- GROHNHEIT, P.E., ANDERSEN, F.M. and LARSEN, H.V., 2011. Area price and demand response in a market with 25% wind power. *Energy Policy*, **39**(12), pp. 8051-8061.
- GROSSMAN, G.M. and HELPMAN, E., 1994. Endogenous Innovation in the Theory of Growth. *Journal of Economic Perspectives*, **8**(1), pp. 23-44.
- HERTER, K., MCAULIFFE, P. and ROSENFELD, A., 2007. An exploratory analysis of California residential customer response to critical peak pricing of electricity. *Energy*, **32**(1), pp. 25-34.

HESHMATI, A., 2014. DEMAND, CUSTOMER BASE-LINE AND DEMAND RESPONSE IN THE ELECTRICITY MARKET: A SURVEY. *Journal of Economic Surveys*, **28**(5), pp. 862-888.

HJALMARSSON, E., 2000. *Nord Pool: A Power Market Without Market Power*. St. Louis, United States, St. Louis: Federal Reserve Bank of St Louis.

HOTELLING, H., 1931. The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, **39**(2), pp. 137-175.

I. STAFFELL and R. GREEN, 2016. Is There Still Merit in the Merit Order Stack? The Impact of Dynamic Constraints on Optimal Plant Mix. *IEEE Transactions on Power Systems*, **31**(1), pp. 43-53.

JOHNSTONE, N., HAŠČIČ, I. and POPP, D., 2010. Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts. *Environmental and Resource Economics*, **45**(1), pp. 133-155.

JOSKOW, P.L., 2011. Comparing the Costs of Intermittent and Dispatchable Electricity Generating Technologies. *American Economic Review*, **101**(3), pp. 238-241.

KITZING, L., MITCHELL, C. and MORTHORST, P.E., 2012. *Renewable energy policies in Europe: Converging or diverging?* .

LABANDEIRA, X., LABEAGA, J.M. and LÓPEZ-OTERO, X., 2017. A meta-analysis on the price elasticity of energy demand. *Energy Policy*, **102**, pp. 549-568.

LANS BOVENBERG, A. and GOULDER, L.H., 2002. *Environmental Taxation and Regulation* \*\*The authors are grateful to Alan Auerbach, Dallas Burtraw, Louis Kaplow, Ian Parry, Steven Shavell, and Robert Stavins for helpful suggestions; to Koshy Mathai, Jeffrey Muller, and Robertson Williams III for excellent research assistance; and to the National Science Foundation (Grant SBR-9310362) and US Environmental Protection Agency (Grant R825313-01) for financial support.

LEHMANN, P. and GAWEL, E., 2013. *Why should support schemes for renewable electricity complement the EU emissions trading scheme?* .

LIJESSEN, M.G., 2007. The real-time price elasticity of electricity. *Energy Economics*, **29**(2), pp. 249-258.

LISKI, M. and VEHVILÄINEN, I., 2016. *Gone with the Wind? An Empirical Analysis of the Renewable Energy Rent Transfer*. Rochester, NY: .

NORD POOL, 2017-last update, The Power Market. Available: <http://www.nordpoolspot.com> [Mar 27, 2017].

NORDREG, 2014. *Nordic Market Report 2014*.

P. PALENSKY and D. DIETRICH, 2011. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **7**(3), pp. 381-388.

- PATERAKIS, N.G., ERDİNÇ, O. and CATALÃO, J.P.S., 2017. An overview of Demand Response: Key-elements and international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **69**, pp. 871-891.
- SALVADORE, M., 2010. Projected Costs of Generating Electricity : 2010 Edition. *IDEAS Working Paper Series from RePEc*, .
- SCHULTE, I. and HEINDL, P., 2017. Price and income elasticities of residential energy demand in Germany. *Energy Policy*, **102**, pp. 512-528.
- SENSFUSS, F., RAGWITZ, M. and GENOESE, M., 2008. The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany. *Energy Policy*, **36**(8), pp. 3086-3094.
- SØRENSEN, P.B., 2014. *Measuring the deadweight loss from taxation in a small open economy*.
- US EPA, O.A., -01-12T09:50:43-05:00, 2016-last update, Global Greenhouse Gas Emissions Data. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> [Sep 13, 2017].
- WINKLER, J., GAIO, A., PFLUGER, B. and RAGWITZ, M., 2016. *Impact of renewables on electricity markets – Do support schemes matter?* .
- WOO, C.K., HOROWITZ, I., MOORE, J. and PACHECO, A., 2011. *The impact of wind generation on the electricity spot-market price level and variance: The Texas experience*.
- WOO, C.K., MOORE, J., SCHNEIDERMAN, B., HO, T., OLSON, A., ALAGAPPAN, L., CHAWLA, K., TOYAMA, N. and ZARNIKAU, J., 2016. Merit-order effects of renewable energy and price divergence in California's day-ahead and real-time electricity markets. *Energy Policy*, **92**, pp. 299-312.
- WÜRZBURG, K., LABANDEIRA, X. and LINARES, P., 2013. *Renewable generation and electricity prices: Taking stock and new evidence for Germany and Austria*.
- Y. HE, M. HILDMANN, F. HERZOG and G. ANDERSSON, 2013. Modeling the Merit Order Curve of the European Energy Exchange Power Market in Germany. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**(3), pp. 3155-3164.